ChinaXiv合作期刊

第 51 卷 第 1 期 金属学报 Vol.51 No.1
2015 年 1 月 第121-128页 ACTA METALLURGICA SINICA Jan. 2015 pp.121-128

面向晶粒尺寸的超声多尺度衰减评价方法*

李雄兵 [1,2] 宋永锋 [1)] 倪培君 [3)] 刘 锋 [2)]

1) 中南大学CAD/CAM研究所, 长沙 410075

2) 中南大学粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083

3) 中国兵器科学研究院宁波分院, 宁波 315103

摘 要 用小波变换获取超声波能量的时间-尺度分布, 研究衰减系数随尺度的分布规律, 定义加权的超声多尺度衰减系数, 结合粒子群算法设计的最优尺度组合及其归一化权重分配策略, 建立晶粒尺寸的超声多尺度衰减评价模型. 选用304不锈钢进行实验, 其衰减系数-尺度分布图表明超声波在小尺度下衰减迅速, 体现了高散射材料中衰减的频率特征; 而随着试样晶粒尺寸增大, 整个尺度范围内的衰减都明显加剧. 实验结果显示, 声速法、传统衰减法与本方法的最大系统误差分别是+12.57%, +5.85%和−1.33%. 对金相法测得平均晶粒尺寸为103.5 μm的验证试样用3种方法进行评价, 结果分别为(110.4±7.8), (98.2±6.6)和(101.7±3.9) μm. 本方法不仅可降低系统误差, 且随机误差也被小波变换的恒Q滤波特性有效抑制.

关键词 晶粒尺寸, 超声无损评价, 多尺度分析, 衰减系数

中图法分类号 TG115.21, TG115.28 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(2015)01-0121-08

ULTRASONIC EVALUATION METHOD FOR GRAIN SIZE BASED ON MULTI-SCALE ATTENUATION

LI Xiongbing [1,2)], *SONG Yongfeng* [1)], *NI Peijun* [3)], *LIU Feng* [2)]

1) CAD/CAM Institute, Central South University, Changsha 410075

2) State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083

3) The Ningbo Branch of Ordnance Science Institute of China, Ningbo 315103

Correspondent: LI Xiongbing, associate professor, Tel: (0731)82655135, E-mail: lixb213@mail.csu.edu.cn

Supported by National Natural Science Foundation of China (Nos.61271356, 51205031 and 51105045), High Technology Research and Development Program of China (No.2012AA03A514), Natural Science Foundation of Hunan Province (No.14JJ2002) and China Postdoctoral Science Foundation (No.2014M562126)

Manuscript received 2014−07−07, in revised form 2014−09−25

ABSTRACT To solve such problems as sensitivity to noise and low accuracy of grain size evaluation using traditional ultrasonic time-domain attenuation method, an ultrasonic nondestructive evaluation model based on multi-scale attenuation coefficient was proposed. The distribution of time- scale of ultrasonic energy was obtained by means of wavelet transformation, then to calculate the distribution of attenuation coefficient with scale, and to make a comprehensive analysis of attenuation characteristics of various scales. After the weighted multi-scale ultrasonic attenuation coefficient was defined, a multi-scale ultrasonic attenuation evaluation model was established on the basis of combination of optimal dimension and normalized weight distribution strategy designed by particle swarm optimization. 304 stainless steel was used in the test. The distribution of attenuation coefficient with scale

* 国家自然科学基金项目 61271356, 51205031 和 51105045, 国家高技术研究发展计划项目 2012AA03A514, 湖南省自然科学基金项目 14JJ2002 及中国博士后科学基金项目 2014M562126 资助

收到初稿日期: 2014−07−07, 收到修改稿日期: 2014−09−25

作者简介: 李雄兵, 男, 1977年生, 副教授

DOI: 10.11900/0412.1961.2014.00369

chinaXiv:202303.00506v1

ChinaXiv合作期刊

shows that ultrasonic wave of small scales attenuates fast, presenting the frequency characteristics of ultrasonic attenuation among high scattering materials. Following increase of the sample grain size, ultrasonic attenuation of all scales was intensified significantly. Test results show that the sound velocity method, the traditional evaluation method and the proposed method have maximum systematic errors of +12.57%, +5.85% and −1.33%, respectively. With these 3 methods, evaluation results of the sample with a mean grain size of 103.5 μm measured by metallographic method are (110.4±7.8), (98.2±6.6) and (101.7±3.9) μm, respectively, showing that the presented method can not only reduce the systemic error, but also can effectively control the random error by constant Q filtering properties of wavelet transformation. This model can be extended to grain size evaluation of other metals.

KEY WORDS grain size, ultrasonic nondestructive evaluation, multi-scale analysis, attenuation coefficient

晶粒尺寸是表征金属材料微观结构的一个重要参数, 对金属材料的屈服强度、塑性及韧性、疲劳强度、蠕变强度、耐腐蚀性能等有重要的影响[1,2]. Hall-Petch公式描述了金属多晶材料晶粒尺寸与屈服强度之间的联系, 体现了尺寸-强度效应[3,4]. 如奥氏体不锈钢焊接件的焊接热影响区晶粒过大, 在高温和交变应力下会导致强度不足、耐腐蚀疲劳性能差, 易出现裂纹成核并沿着焊接边缘传播, 最后造成断裂事故[5]. 因此, 有效测量金属材料的晶粒尺寸, 对保障关键装备的可靠性尤显重要.

金属材料晶粒尺寸测量方法可分为有损和无损两种. 有损方法需要对材料进行破坏, 如金相法及电子背散射衍射法(EBSD). 金相法具有结果直观及检测精度高等优点[6], 但分析程序繁琐、检测效率偏低. EBSD方法[7]不需要腐蚀, 但制样时对抛光的要求更严格. 无损法具有方便、快捷且无需破坏材料等优点, 根据测量原理的不同, 主要有涡流法和超声法. 其中涡流法的感应交变电流具有集肤效应, 仅能反映试样表面或近表面处的晶粒尺寸信息, 且用电导率评价晶粒尺寸的非线性误差大[8]. 而超声法具有能检测材料内部微观组织特性的优点. 因此, 国内外学者在超声法评价材料晶粒尺寸方面开展了大量的理论及应用研究.

利用超声法评价晶粒尺寸主要包括背散射法、衰减法、速度法. 其中背散射法[9,10]的理论依据是平均晶粒尺寸与超声背散射系数正相关, 但背散射信号实质上属于杂波信号, 对晶粒尺寸敏感区间有限, 故能测量的晶粒尺寸范围窄. 声速法[11,12]利用晶界弹性模量的不同所引起的声速差异评价平均晶粒尺寸, 然而此方法对部分金属材料的灵敏度偏低[13], 晶粒尺寸的评价结果相对误差大. 衰减法是目前应用较为广泛的方法, 当超声波在平均晶粒尺寸不同的材料中传播时, 声能的衰减程度有差异. 在衰减法的应用中, 既可利用时域下的总衰减系数与平均晶粒尺寸建立基于实验的拟合评价模型[14,15], 也可在频域下通过衰减系数谱, 建立幂函数形式的晶粒尺寸评价模型[16]. 另外有频谱峰值法[17], 实际上也是衰减法的变种. 而超声回波信号是一种时变非平稳信号, 传统的衰减法无论是时域还是频域的, 都丢失了局部时间范围内的频谱信息所承载的更丰富的晶粒尺寸信息[18], 且都容易受噪声信号干扰的影响, 进而影响传统衰减法的晶粒尺寸评价精度及可靠性. 基于以上研究现状, 本工作研究一种面向晶粒尺寸的超声多尺度衰减评价方法, 以提高金属材料晶粒尺寸无损评价的有效性.

1 实验方法

1.1 多尺度衰减评价模型

若用于建立评价模型的试样数为N, 第k个试样 ($k=1, 2, \cdots, N$) 的平均厚度为H_k, 假设所有用于建模的试样在超声波传播方向上的晶粒尺寸和取向是均匀分布的, 采用金相法分别测量其晶粒尺寸, 平均晶粒尺寸记为$\overline{D_k}$. 利用脉冲反射法采集试样的超声A波信号$A_k(t)$, 通过施加矩形窗截取$A_k(t)$中的表面回波及一次底面回波信号, 分别记表面波信号为$x_k(t)$, 一次底波信号为$y_k(t)$. 为了探求模型最优的拟合形式, 先考虑建立传统时域衰减模型, 其中总衰减系数α_k为:

$$\alpha_k = \frac{1}{2H_k}\ln\left(\frac{\max(|x_k(t)|)}{\max(|y_k(t)|)}\right) \tag{1}$$

用多次测试的方法消除随机误差, 每个试样共采集S个超声信号, 记由第k个试样第j个信号 ($j=1, 2, \cdots, S$) 得到的总衰减系数为$\alpha_{k,j}$, 则平均总衰减系数$\overline{\alpha_k}$为:

$$\overline{\alpha_k} = \frac{1}{S}\sum_{j=1}^{S}\alpha_{k,j} \tag{2}$$

用最小二乘法对$\overline{\alpha_k}$和$\overline{D_k}$进行拟合, 若选取线性无关的基底$\{\varphi_0^*, \varphi_1^*, \cdots, \varphi_n^* | n<N-1\}$时, 拟合函数$\tilde{D}(\overline{\alpha_k})$误差最小, 则称这组基底为最优基底, 并将其作为多尺度衰减评价模型的基底. 由于传统时域衰

chinaXiv:202303.00506v1

ChinaXiv合作期刊

减模型体现了晶粒尺寸与超声衰减之间的直接联系, 故其拟合形式可以作为多尺度衰减评价模型拟合形式的参考.

然后选定任一小波母函数 $\psi(t)$, 对 $x_k(t)$ 和 $y_k(t)$ 进行连续小波变换, 分别求得表面波和一次底波的小波系数矩阵 $X_k(a,b)$ 和 $Y_k(a,b)$ 为:

$$X_k(a,b)=\left\langle x_k(t),\psi_{a,b}(t)\right\rangle=\frac{1}{\sqrt{a}}\int_R x_k(t)\overline{\psi_{a,b}(t)}\,\mathrm{d}t \tag{3}$$

$$Y_k(a,b)=\left\langle y_k(t),\psi_{a,b}(t)\right\rangle=\frac{1}{\sqrt{a}}\int_R y_k(t)\overline{\psi_{a,b}(t)}\,\mathrm{d}t \tag{4}$$

式中, a 为尺度因子, b 为平移因子, $\psi_{a,b}(t)$ 为与 $\psi(t)$ 相应的小波函数族. 连续小波变换中 a 取连续的正整数, 共计分解 M 层. 小波系数矩阵中的第 i 行 $(i=1, 2, \cdots, M)$ 为原信号在尺度 a_i 下的小波分量, 第 k 个试样在尺度 a_i 下的衰减系数 $\alpha_k^{a_i}$ 定义为:

$$\alpha_k^{a_i}=\frac{1}{2H_k}\ln\left(\frac{\max(|X_k(a_i,b)|)}{\max(|Y_k(a_i,b)|)}\right) \tag{5}$$

假定选 m 个有代表性尺度 $\{\hat{a}_r|r=1, 2, \cdots, m\}$, 分别提取这些尺度下的衰减系数, 通过加权定义超声波的多尺度衰减系数 $\alpha_k^{\{\hat{a}_r\}}$ 为:

$$\alpha_k^{\{\hat{a}_r\}}=\sum_{r=1}^{m}\left(w_r\cdot\alpha_k^{\hat{a}_r}\right)=[w_1,w_2,\cdots,w_m]\cdot\left[\alpha_k^{\hat{a}_1},\alpha_k^{\hat{a}_2},\cdots,\alpha_k^{\hat{a}_m}\right]^{\mathrm{T}} \tag{6}$$

式中, $\boldsymbol{w}=[w_1, w_2, \cdots, w_m]$ 为各个尺度的归一化权重向量, 满足 $\sum_{r=1}^{m}(w_r)=1$, 各试样使用相同的代表性尺度和相同的权重计算多尺度衰减系数. 同样用多次测试的方法, 通过第 k 个试样第 j 个信号得到各个代表性尺度下的衰减系数 $\alpha_{k,j}^{\hat{a}_r}$, 再计算各个代表性尺度下的平均衰减系数 $\overline{\alpha_k^{\hat{a}_r}}$, 继而获得平均多尺度衰减系数 $\overline{\alpha_k^{\{\hat{a}_r\}}}$. 可见, 构造与 $\overline{D}_k$ 拟合精度最高的平均多尺度衰减系数 $\overline{\alpha_k^{\{\hat{a}_r\}}}$, 关键在于如何选择一系列有代表性的尺度 $\{\hat{a}_r\}$ 及相应的归一化权重 $\boldsymbol{w}$.

本工作通过改造粒子群优化算法, 设计了最优的尺度组合及其归一化权重分配策略, 算法的具体思路如下:

(1) 假定所有尺度均选为代表性尺度, 即 $m=M$, 且归一化权重向量 $\boldsymbol{w}$ 是由原权重向量 $\boldsymbol{W}$ 归一化得到. 算法的目标是使非代表性尺度对应的原权重为零.

(2) 若粒子总数为 Q, 设第 q 个粒子 $(q=1, 2,\cdots, Q)$ 当前所处的位置代表一组 M 维的原权重向量 $\boldsymbol{W}_q(T)$, 速度为 $\boldsymbol{v}_q(T)$, 其中 T 为迭代次数, 速度和位置更新的函数分别为:

$$\boldsymbol{v}_q(T+1)=\Omega\boldsymbol{v}_q(T)+c_1r_1(\boldsymbol{p}_q-\boldsymbol{W}_q)+c_2r_2(\boldsymbol{p}_{\mathrm{g}}-\boldsymbol{W}_{\mathrm{g}}) \tag{7}$$

$$\boldsymbol{W}_q(T+1)=\boldsymbol{W}_{\mathrm{g}}(T)+\boldsymbol{v}_q(T+1) \tag{8}$$

式中, Ω 为惯性系数, c_1 和 c_2 分别为自身和社会学习因子, r_1 和 r_2 为[0, 1]的随机数, $\boldsymbol{p}_q$ 为个体最优解, $\boldsymbol{p}_{\mathrm{g}}$ 为群体最优解, $\boldsymbol{v}_{\max}$ 为最大飞行速度. 若粒子 q 位置更新后, 原权重向量 $\boldsymbol{W}_q(T+1)$ 中某个位置的值为负数, 则将其置零, 以此保证了迭代后唯有代表性尺度的权重不为零.

(3) 当粒子位置更新并置零后, 对其进行归一化得到 $\boldsymbol{w}_q(T+1)$, 结合所有尺度下的平均衰减系数, 根据式(6)计算各试样的平均多尺度衰减系数 $\overline{\alpha_k^{\{\hat{a}_r\}}}$. 以最优基底 $\{\varphi_0^*, \varphi_1^*, \cdots, \varphi_n^*\}$ 对 $\overline{\alpha_k^{\{\hat{a}_r\}}}$ 和 $\overline{D}_k$ 进行最小二乘法拟合, 并以平均多尺度衰减系数的拟合值 $\tilde{D}\left(\overline{\alpha_k^{\{\hat{a}_r\}}}\right)$ 与实际值之间残差的二范数为适应度值:

$$F=\left\|(\delta_1,\delta_2,\cdots,\delta_N)\right\|_2=\sqrt{\sum_{k=1}^{N}\left(\tilde{D}\left(\overline{\alpha_k^{\{\hat{a}_r\}}}\right)-\overline{D}_k\right)^2} \tag{9}$$

根据适应度 F 进行搜索, 可找到适应度最小的最优尺度组合 $\{\hat{a}_r^*|r=1, 2, \cdots, m^*\}$ 及相应的归一化权重 $\boldsymbol{w}^*$. 在此基础上计算平均多尺度衰减系数 $\overline{\alpha_k^{\{\hat{a}_r\}}}$, 并由最小二乘法建立最后的多尺度衰减评价模型:

$$\tilde{D}\left(\overline{\alpha_k^{\{\hat{a}_r^*\}}}\right)=d_0\varphi_0^*\left(\overline{\alpha_k^{\{\hat{a}_r^*\}}}\right)+d_1\varphi_1^*\left(\overline{\alpha_k^{\{\hat{a}_r^*\}}}\right)+\cdots+d_n\varphi_n^*\left(\overline{\alpha_k^{\{\hat{a}_r^*\}}}\right) \tag{10}$$

式中, $\{d_0, d_1, \cdots, d_n\}$ 为最优基底对应的拟合系数. 需注意, 不同材料的多尺度衰减评价模型都需标定其最优尺度组合、权重及拟合系数.

1.2 试样制作及前期处理

选用牌号为06Cr19Ni10的304不锈钢作为实验对象. 首先将直径25 mm的不锈钢棒材用线切割获得6个高15 mm的坯料; 用1610BL型高温炉分别进行如表1所示的固溶处理, 使各试样的晶粒尺寸按梯度分布, 接着对所有试样进行一次去应力退火; 热处理完成后对热处理后的各试样进行磨样, 并用螺旋测微器测量平面试样的厚度, 结果见表1, 其中 $\overline{D}$ 为金相法测定的平均晶粒尺寸, 金相法的测量相对误差表示为 E.

然后采用水浸脉冲反射法采集各试样的超声A

chinaXiv:202303.00506v1

ChinaXiv合作期刊

表1 各试样的热处理规范、厚度与平均晶粒尺寸

Table 1 Heat treatment specification, thickness and mean grain size of the samples

Sample No.	Heating temperature ℃	Holding time / h	Cooling method	Sample thickness / mm	$\overline{D}$ / μm	E / %
1	1080	2	W.Q.	14.621	72.4	2.23
2	1080	4	W.Q.	14.236	82.5	3.06
3	1080	6	W.Q.	13.762	90.6	4.49
4	1080	8	W.Q.	13.546	105.6	4.06
5	1180	6	W.Q.	13.447	135.4	1.65
6	1180	8	W.Q.	12.847	141.9	2.39

Note: $\overline{D}$—measured mean grain size, E —relative error of the metallographic method

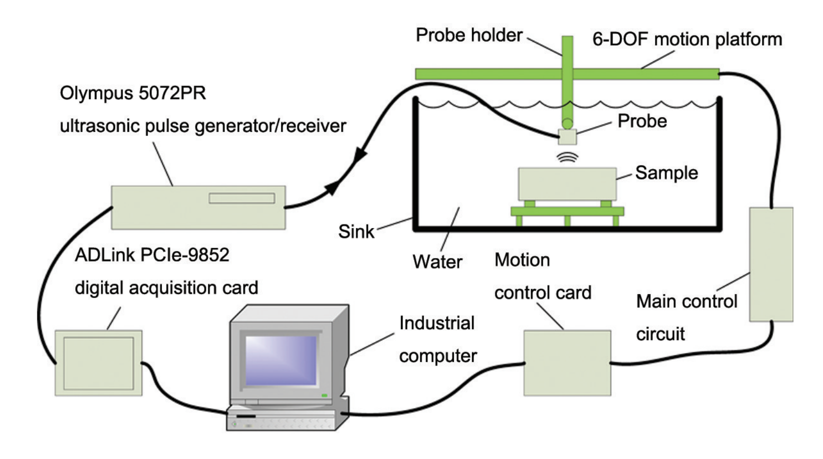


图1 超声信号采集系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the ultrasonic signal acquisition system

波信号, 每个试样采20组信号. 如图1所示, 超声信号采集系统由六自由度运动平台、Olympus 5072PR型超声脉冲发生/接收器、10 MHz的V312-SU型水浸纵波平探头、ADLink PCIe-9852型高速数字采集卡构成.

超声信号数据采集完毕后, 对试样进行破坏获取金相图: 每个试样任意选取3个检测面, 分别进行切割、镶嵌、磨样及抛光, 并配置20%HF+10%HNO_3+70%H_2O的浸蚀剂[19], 对各检测面进行20 min的浸蚀; 用DM4000M型金相显镜对各试样每个检测面随机选取5个视场进行拍照, 各试样的一幅金相图见图2.

2 结果与分析

2.1 多尺度衰减评价模型的建立

对第k个试样 ($k=1, 2, \cdots, 6$) 各采集的20组超声信号设置双闸门, 以矩形窗截取其表面波与底面波, 如No.2试样的一个原始超声信号、表面波与底面波见图3.

根据GB/T 6394-2002用金相法测量平均晶粒尺寸, 利用测量网格进行平均晶粒尺寸的截线法测量, 测得平均晶粒尺寸 $\overline{D_k}$ 及其相对误差见表1. 根据式(1)和(2)计算平均总衰减系数 $\overline{\alpha_k}$. 图4显示了6个试样的平均总衰减系数 $\overline{\alpha_k}$ 和平均晶粒尺寸 $\overline{D_k}$ 的散点图. 从图中可见各点均在一条直线附近, 则拟合的最优基底为 $\{\varphi_0^*, \varphi_1^*\}=\{1, \alpha\}$, 故用最小二乘法的传统衰减法评价模型为:

$$\tilde{D}\left(\overline{\alpha_k}\right)=-57.355+1.585\overline{\alpha_k} \tag{11}$$

式中, $\overline{\alpha_k}$ 的单位为Np· m^{-1}, $\tilde{D}(\overline{\alpha_k})$ 的单位为μm.

根据式(3)和(4), 选用Haar小波对表面波 $x_k(t)$ 与底面波 $y_k(t)$ 分别进行分解层数为128的小波变换, 得到表面波和底波小波系数矩阵 $X_k(a,b)$ 和 $Y_k(a,b)$. 其中对图3中No.2试样由双闸门得到的表面波和底面波计算时间-尺度分布, 并用小波尺度谱图显示, 结果如图5所示. 根据式(5)计算各试样每一个尺度下的衰减系数, 并通过所采集的20组信号计算其平均值, 得到如图6所示的平均衰减系数谱图.

图6中同一试样在尺度小时衰减系数大, 同一

chinaXiv:202303.00506v1

ChinaXiv合作期刊

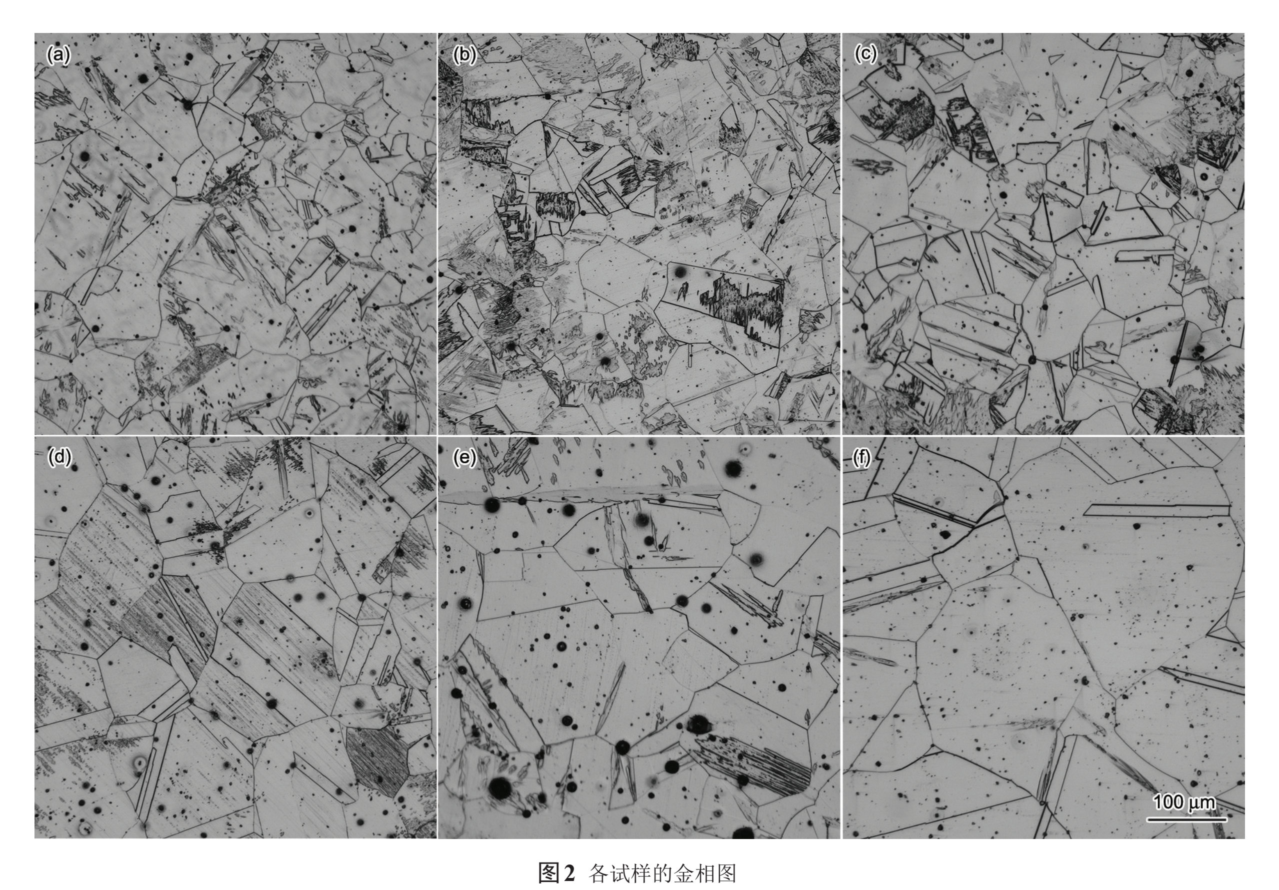


图2 各试样的金相图

Fig.2 OM images of the samples No.1 (a), No.2 (b), No.3 (c), No.4 (d), No.5 (e) and No.6 (f)

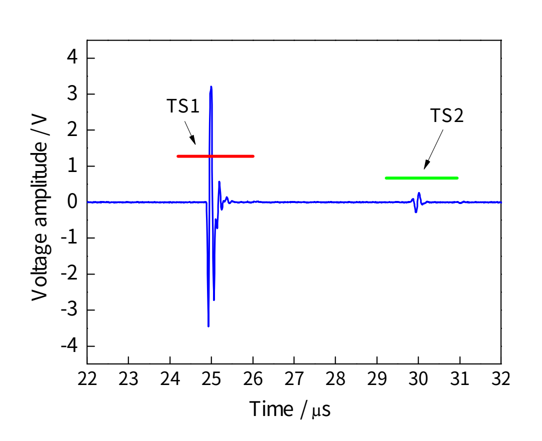


图3 No.2 试样的一组原始超声信号及其表面波与底面波

Fig.3 One original ultrasonic signal of the sample No. 2 (TS1—threshold No.1 for the front- wall echo, TS2 —threshold No.2 for the first back-wall echo)

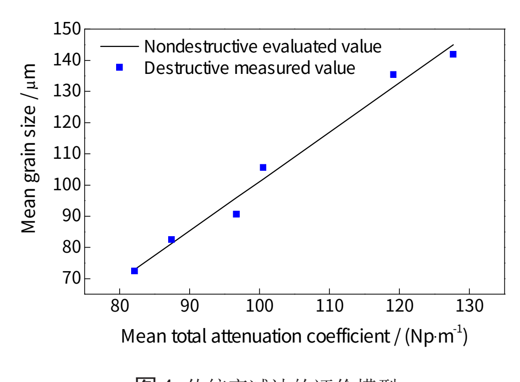


图4 传统衰减法的评价模型

Fig.4 Evaluation model of traditional attenuation method

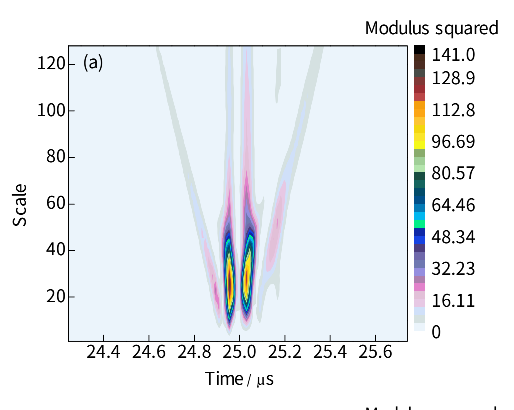
尺度在晶粒尺寸大时衰减系数小. 这表明了超声波在小尺度下衰减迅速, 体现了散射材料中超声高频分量衰减较大的频率特征; 另一方面表明随着试样晶粒尺寸增大, 整个尺度范围内的衰减都明显加剧, 即不同尺度下的衰减系数都与晶粒尺寸正相关.

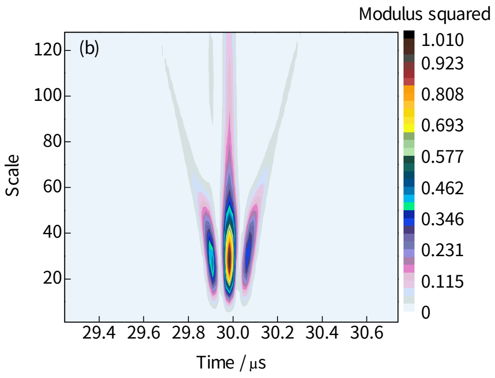
利用本工作改造的粒子群优化算法搜索最优尺度组合及相应的归一化权重. 其中第q个粒子的初始位置(即原权重向量$W_q(0)$)取[1, 5]的均匀分布, 由于假定所有尺度均选为代表性尺度, 所以$W_q(0)$有128个分量; 初始速度$\boldsymbol{v}_q(0)$取[0, 0.05]的均匀分布, 最大飞行速度$v_{\max}$取0.05; 根据文献[20], 惯性系数Ω取0.729, 个体学习因子c_1和社会学习因子c_2均取1.494. 经过搜索, 群体最优解$\boldsymbol{p}_g$中只剩下尺度1, 2和49的原权重不为零, 归一化之后权重分别为0.028, 0.087和0.885. 故这3个尺度为最优尺度组合, 即$\{\hat{a}_1^*, \hat{a}_2^*, \hat{a}_3^*\}=\{a_1, a_2, a_{49}\}$, 据此计算平均多尺度衰减系数可获得最优的拟合效果, 代入式(6)得:

chinaXiv:202303.00506v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202303.00506v1





Color online

图5 No.2试样的表面波和底波时间-尺度分布图

Fig.5 Time-scale distribution of sample No.2

(a) front-wall echo obtained by TS1

(b) first back-wall echo obtained by TS2

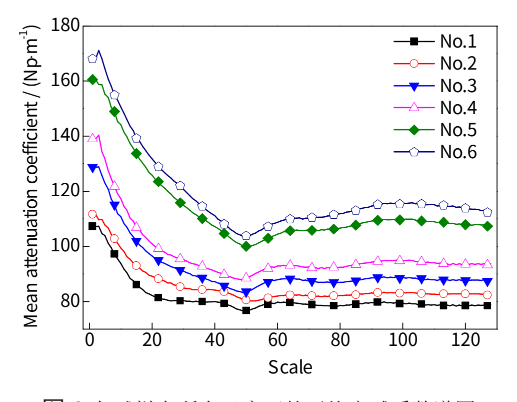


图6 各试样在所有尺度下的平均衰减系数谱图

Fig.6 Mean attenuation coefficient spectrogram of the samples

$$\overline{\alpha_k^{\{\alpha_k^{a_1},\alpha_k^{a_2},\alpha_k^{a_{49}}\}}} = 0.028\overline{\alpha_k^{a_1}} + 0.087\overline{\alpha_k^{a_2}} + 0.885\overline{\alpha_k^{a_{49}}} \tag{12}$$

通过此式可分别得到6个试样的平均多尺度衰减系数. 最后用最小二乘法以最优基底$\{\varphi_0^*, \varphi_1^*\}=\{1, \alpha\}$对$\overline{\alpha_k^{\{\alpha_k^{a_1},\alpha_k^{a_2},\alpha_k^{a_{49}}\}}}$和平均晶粒尺寸$\overline{D_k}$进行拟合, 得到该批试样晶粒尺寸的多尺度衰减评价模型为:

$$\tilde{D}(\overline{\alpha_k^{\{\alpha_k^{a_1},\alpha_k^{a_2},\alpha_k^{a_{49}}\}}}) = -110.021 + 2.281\overline{\alpha_k^{\{\alpha_k^{a_1},\alpha_k^{a_2},\alpha_k^{a_{49}}\}}} \tag{13}$$

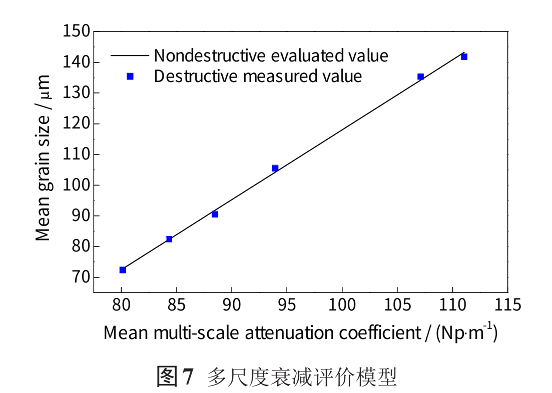


图7 多尺度衰减评价模型

Fig.7 Evaluation model based on multi-scale attenuation

式中, $\overline{\alpha_k^{\{\alpha_k^{a_1},\alpha_k^{a_2},\alpha_k^{a_{49}}\}}}$的单位为Np·m^{-1}, $\tilde{D}(\overline{\alpha_k^{\{\alpha_k^{a_1},\alpha_k^{a_2},\alpha_k^{a_{49}}\}}})$的单位为μm. 图7是平均晶粒尺寸的多尺度衰减评价模型, 通过与图4对比可见, 平均多尺度衰减系数对平均晶粒尺寸的线性性更强, 与拟合直线偏离程度更低.

2.2 有效性分析

为验证本方法的有效性, 将本模型与文献[13]所代表的传统声速法模型和文献[15]所代表的传统时域衰减法模型进行比较. 通过实验得到的平均晶粒尺寸, 纵波声速评价模型为$\tilde{D}(\overline{v_{\mathrm{L}}}) = 2282.255 - 0.376\,\overline{v_{\mathrm{L}}}$, 式中$\overline{v_{\mathrm{L}}}$的单位为m·s^{-1}. 相对于金相法测量结果, 得到3种模型的评价结果及误差带如图8所示. 更详细的对比分析数据见表2, 表中D_{v}, D_{t}, D_{m}分别表示声速法、传统衰减法及本方法的评价结果, E_{v}, E_{t}, E_{m}表示这3种无损评价方法与金相法测量结果的相对误差. 从图8中可见, 声速法模型及传统衰减法模型相对于45°线的波动大, 误差带的范围宽, 而本模型评价值相对于45°线的波动小, 且误差带的范围窄, 更接近于金相法测量误差带的水平.

以表1所示的金相法测量值为真值, 计算无损评价结果的相对误差即系统误差, 声速法、传统衰减法与本方法的最大系统误差分别是+12.57%, +5.85%和−1.33%. 从拟合本身的精度看, 前2种模型评价值与真值之间残差的二范数为12.995和8.235, 而本模型仅为2.544. 这是由于声速法模型对本工作所选用的304不锈钢灵敏度低, 且有一定的非线性误差; 此外传统衰减法模型只考虑了时域的衰减信息, 没有考虑用频域衰减信息加以修正. 另一方面, 对比3种模型评价值的3σ误差带范围可见, 随机误差对声速法影响大, 主要是因为回波前沿定位难、抗干扰能力差, 对传统衰减法模型的影响则有所下降, 对本模型的影响已经并不显著, 其

ChinaXiv合作期刊

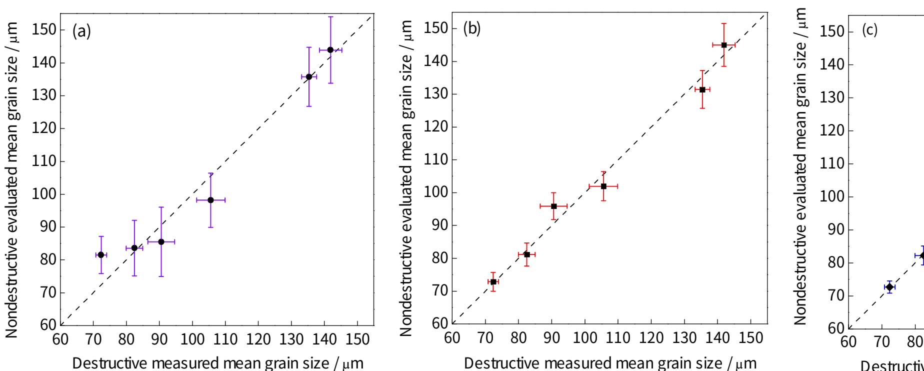


图8 不同方法的评价结果及误差带

Fig.8 Comparison of evaluation results and error bands using different methods

(a) traditional velocity method　(b) traditional attenuation method　(c) multi-scale attenuation method

表2 不同方法的性能对比分析

Table 2 Performance analysis of different methods

Sample No.	D_v / μm	E_v / %	D_t / μm	E_t / %	D_m / μm	E_m / %
1	81.5±5.7	12.57	72.9±2.9	0.69	72.7±1.9	0.41
2	83.6±8.5	1.33	81.2±3.5	−1.58	82.3±2.8	−0.24
3	85.5±10.6	−5.63	95.9±4.1	5.85	91.7±4.0	1.21
4	98.2±8.3	−7.01	102.0±4.5	−3.41	104.2±4.4	−1.33
5	135.7±9.0	0.22	131.5±5.7	−2.88	134.3±2.7	−0.81
6	143.9±10.1	1.41	145.0±6.5	2.18	143.3±3.5	0.99

Note: D_v, D_t, D_m—evaluation results of the velocity model, the attenuation model and the proposed model;
E_v, E_t, E_m—corresponding relative errors between these three methods and the metallographic method

中No.5试样评价值的误差带的变化最为明显, 由前2种模型的±9.0和±5.7 μm下降为±2.7 μm.

为了验证传统模型和本模型在实际应用中的性能, 采用1.2节所示的方法进行验证试样的制作和前期处理, 利用KSL-1400X型箱式马弗炉对一个直径25 mm, 长15 mm的304不锈钢试样进行热处理, 加热温度为1070 ℃, 保温8 h水淬, 再去应力退火. 按GB/T 6394-2002测得平均晶粒尺寸为103.5 μm, 相对误差为2.89%. 接着对采集到的20组超声A波信号进行多尺度分析, 再根据上述3种评价模型计算其晶粒尺寸的无损评价结果分别为(110.4±7.8), (98.2±6.6)及(101.7±3.9) μm.

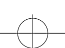
综上所述, 本模型的评价精度显著提高, 能有效降低晶粒尺寸评价过程中的系统误差和抑制随机误差. 从理论上分析可归结为两个原因: 一是充分利用了时频域信息, 通过小波变换可以全面考察不同尺度下的衰减特性, 再结合粒子群算法进行尺度的选取和权重的分配, 可搜索得到一种对晶粒尺寸相关性强的多尺度衰减系数, 降低晶粒尺寸测量的系统误差; 二是利用了小波变换的恒Q滤波特性[21], 多尺度分解超声信号后, 大尺度下包含较少的低频成分, 抗高频噪声干扰能力强, 而小尺度下包含较多的高频成分, 整个带宽内能量集中, 噪声的影响不显著, 综合两种尺度下的抗噪能力有效抑制了评价结果的随机误差. 可见, 通过对信号的多尺度分析, 能发现信号中更丰富的晶粒尺寸信息, 进而提高晶粒尺寸无损评价的精度. 下一步研究针对变曲率被测对象增加超声衍射引起的衰减项, 使本研究的多尺度超声衰减评价方法更具有实用价值.

3　结论

(1) 分析传统超声衰减法评价金属材料平均晶粒尺寸的局限性, 提出超声多尺度衰减系数的新思路, 综合利用不同尺度下的超声波衰减特性进行晶粒尺寸无损评价, 充分发挥了大尺度抗干扰能力强, 小尺度能量高的优势.

(2) 基于超声波的多尺度衰减系数, 结合粒子群算法设计了最优尺度组合及其归一化权重分配策

chinaXiv:202303.00506v1



ChinaXiv合作期刊

略, 建立晶粒尺寸的超声多尺度衰减评价模型, 有效抑制了模型中拟合本身带来的误差.

(3) 采用304不锈钢试样进行晶粒尺寸测量实验, 结果表明本方法相对于传统的超声声速法和衰减法, 具有系统误差小、误差带更窄的优势. 本方法可推广于其他金属材料的晶粒尺寸无损评价.

参考文献

[1] Prasad K S, Rao C S, Rao D N. *Acta Metall Sin (Engl Lett)*, 2012; 25: 179

[2] Wang S H, Liu Z Y, Wang G D. *Acta Metall Sin*, 2009; 45: 61
(王书晗, 刘振宇, 王国栋. 金属学报, 2009; 45: 61)

[3] Zhao Y, Chen Z, Long J, Yang T. *Acta Metall Sin (Engl Lett)*, 2014; 27: 81

[4] Lehto P, Remes H, Saukkonen T, Hänninen H, Romanoff J. *Mater Sci Eng*, 2014; A592: 28

[5] Andrés R, Galvis E, Hormaza W. *Eng Fail Anal*, 2011; 18: 1791

[6] Voort G F V. *Prakt Metall*, 2013; 50: 239

[7] Schwartz A J, Kumar M, Adams B L, Field D P. *Electron Backscatter Diffraction in Materials Science*. New York: Springer, 2009: 1

[8] Sabbagh E H, Sabbagh H A, Murphy R K, Sheila-Vadde A, Blodgett M P, Knopp J, Aldrin J C. In: Thompson D O, Chimenti D E eds., *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, New York: American Institute of Physics, 2009: 742

[9] Guo Y, Thompson R B, Margetan F J. In: Thompson D O, Chimenti D E, eds., *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, New York: American Institute of Physics, 2003: 1347

[10] Panetta P D, Bland L G, Tracy M, Hassan W. In: The Minerals, Metals & Materials Society (TMS) ed., *TMS2014 Annual Meeting Supplemental Proceedings*, Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2014: 721

[11] Ünal R, Sarpün I H, Yalım H A, Erol A, Özdemir T, Tuncel S. *Mater Charact*, 2006; 56: 241

[12] Zuev L B, Semukhin B S, Zarikovskaya N V. *Int J Solids Struct*, 2003; 40: 941

[13] Laux D, Cros B, Despaux G, Baron D. *J Nucl Mater*, 2002; 300: 192

[14] Aghaie-Khafri M, Honarvar F, Zanganeh S. *J Nondestruct Eval*, 2012; 31: 191

[15] Őzkan V, Sarpünb I H. *Acta Phys Pol*, 2012; 121A: 184

[16] Zeng F, Agnew S R, Raeisinia B, Myneni G R. *J Nondestruct Eval*, 2010; 29: 93

[17] Kumar A, Jayakumar T, Palanichamy P, Raj B. *Scr Mater*, 1999; 40: 333

[18] Sharma G K, Kumar A, Babu Rao C, Jayakumar T, Raj B. *NDT&E Int*, 2013; 53: 1

[19] Dong J K. *Heat Treat Met*, 2011; 36: 133
(董加坤. 金属热处理, 2011; 36: 133)

[20] Eberhart R C, Shi Y. In: Zalzala A ed., *IEEE Proceedings of the Congress Evolutionary Computation*, New York: IEEE, 2000: 84

[21] Le T P, Argoul P. *J Sound Vib*, 2004; 277: 73

(责任编辑:毕淑娟)

chinaXiv:202303.00506v1

